



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
G01J 4/04 (2023.08)

(21)(22) Заявка: 2023109819, 17.04.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
17.04.2023

Дата регистрации:  
24.10.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.04.2023

(45) Опубликовано: 24.10.2023 Бюл. № 30

Адрес для переписки:  
199034, Санкт-Петербург, Университетская  
наб., 7/9, СПбГУ, Главное Управление защиты  
и использования интеллектуальной  
собственности, Матвееву А.А., Матвеевой Т.И.

(72) Автор(ы):

Рыбкин Артем Геннадиевич (RU),  
Рыбкина Анна Алексеевна (RU),  
Тарасов Артем Вячеславович (RU),  
Ерыженков Александр Владимирович (RU),  
Шикин Александр Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Санкт-Петербургский  
государственный университет" (СПбГУ)  
(RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: CN 109297602 A, 01.02.2019. CN  
111982290 A, 24.11.2020. RU 2662042 C1,  
23.07.2018. RU 2452924 C1, 10.06.2012.

(54) Инфракрасный детектор циркулярно-поляризованного излучения на основе графена

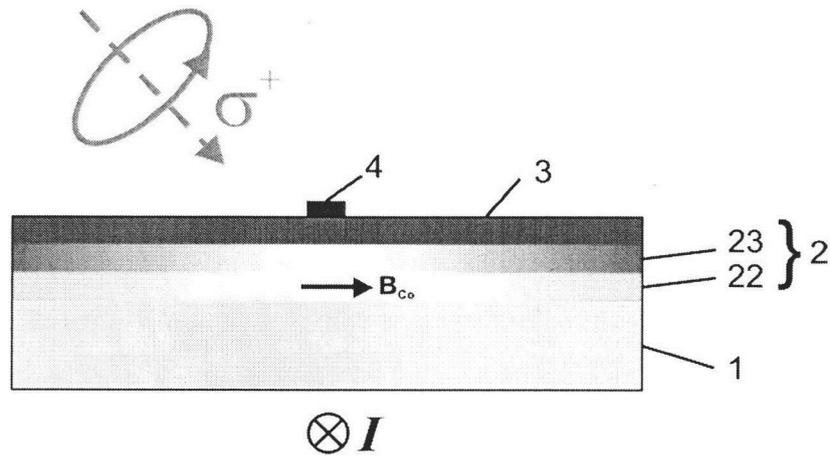
(57) Реферат:

Инфракрасный детектор включает базовый слой и сформированный на нем комбинированный металлический слой, состоящий из однородного слоя и слоя, содержащего структуры, расположенные периодически в горизонтальном направлении, графеновый слой, расположенный на металлическом слое, и электроды для пропускания электрического тока. Однородный слой выполнен из монокристаллического слоя кобальта с внутрислоевой намагниченностью. Слой с периодическими структурами выполнен из слоя золота толщиной

0,2-0,3 нм с периодическими структурными дислокациями треугольной формы. Графеновый слой выполнен из эпитаксиального графена на металлическом слое. Электроды расположены на графеновом слое так, что направление пропускания тока и намагниченность слоя кобальта взаимно перпендикулярны. Технический результат заключается в расширении спектрального диапазона детектируемого излучения, уменьшении размеров устройства и расширении температурного диапазона его работы. 3 ил.

RU 2 805 784 C1

RU 2 805 784 C1



Фиг. 1

RU 2805784 C1

RU 2805784 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01J 4/04 (2023.08)*

(21)(22) Application: **2023109819, 17.04.2023**

(24) Effective date for property rights:  
**17.04.2023**

Registration date:  
**24.10.2023**

Priority:

(22) Date of filing: **17.04.2023**

(45) Date of publication: **24.10.2023** Bull. № 30

Mail address:

**199034, Sankt-Peterburg, Universitetskaya nab., 7/  
9, SPbGU, Glavnoe Upravlenie zashchity i  
ispolzovaniya intellektualnoj sobstvennosti,  
Matveevu A.A., Matveevoj T.I.**

(72) Inventor(s):

**Rybkin Artem Gennadievich (RU),  
Rybkina Anna Alekseevna (RU),  
Tarasov Artem Vyacheslavovich (RU),  
Eryzhenkov Aleksandr Vladimirovich (RU),  
Shikin Aleksandr Mikhajlovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij  
gosudarstvennyj universitet" (SPbGU)" (RU)**

(54) **INFRARED DETECTOR OF CIRCULARLY POLARIZED RADIATION BASED ON GRAPHENE**

(57) Abstract:

FIELD: detectors.

SUBSTANCE: infrared detector includes a base layer and a combined metal layer formed on it, consisting of a uniform layer and a layer containing structures arranged periodically in the horizontal direction, a graphene layer located on the metal layer, and electrodes for passing electric current. The homogeneous layer is made of a single-crystal cobalt layer with in-plane magnetization. The layer with periodic structures is made of a layer of gold 0.2-0.3

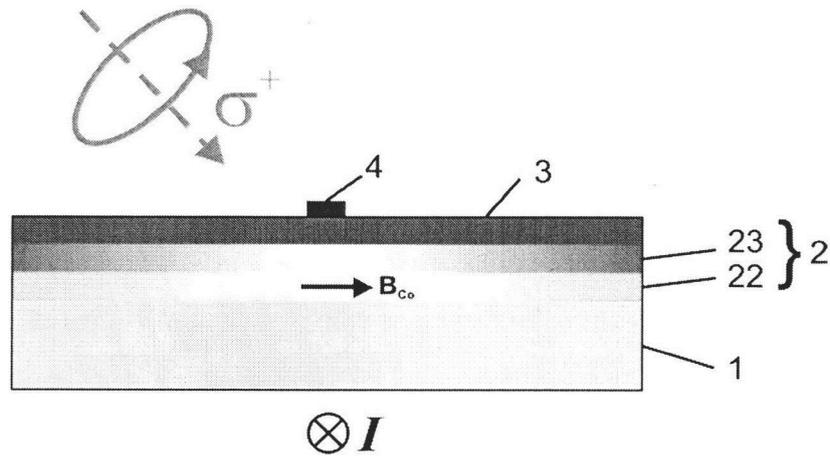
nm thick with periodic structural dislocations of a triangular shape. The graphene layer is made of epitaxial graphene on a metal layer. The electrodes are located on the graphene layer so that the direction of current transmission and the magnetization of the cobalt layer are mutually perpendicular.

EFFECT: expanding the spectral range of the detected radiation, reducing the size of the device and expanding the temperature range of its operation.

1 cl, 3 dwg

**RU 2 805 784 C1**

**RU 2 805 784 C1**



Фиг. 1

RU 2805784 C1

RU 2805784 C1

Область техники

Изобретение относится к области оптоэлектроники и валлитроники и предназначено для прямого детектирования циркулярно-поляризованного излучения в среднем инфракрасном диапазоне.

5 Описание предшествующего уровня техники

Проблема детектирования излучения с циркулярной (круговой) поляризацией является высоко актуальной задачей в связи с развитием оптических технологий, квантовых вычислений и обработки информации. При этом обычные инфракрасные (ИК) детекторы требуют дополнительного использования поляризаторов, чтобы регистрировать  
10 поляризованное излучение, что усложняет конструкцию и повышает стоимость устройства. Поэтому конструкция детектора, обеспечивающая прямое детектирование циркулярно-поляризованного излучения благодаря использованию чувствительных к данному излучению материалов, является предпочтительной.

Известно устройство для детектирования инфракрасного циркулярно-поляризованного излучения [1], в котором рабочий слой, чувствительный к излучению, выполнен из Вейлевского полуметалла и контактирует с двумя электродами для регистрации фототока. Общим признаком с заявленным устройством является использование в качестве рабочего слоя материала, чувствительного к излучению с циркулярной поляризацией, и использование особенностей электронной структуры для  
15 оптоэлектрического преобразования излучения. Однако недостатком использования данных материалов является низкая чувствительность к излучению в среднем инфракрасном диапазоне.

Известно другое устройство для детектирования циркулярно-поляризованного излучения и определения его знака [2], в котором в качестве рабочего слоя используется  
25 серебро-палладиевая резистивная пленка. Данное решение позволяет регистрировать циркулярно-поляризованное излучение и его знак посредством измерения фотоЭДС в рабочем диапазоне от ультрафиолета (0,25 мкм) до средней инфракрасной области (5 мкм). Однако недостатками известного устройства являются его высокая стоимость из-за использования толстых пленок дорогостоящих драгоценных металлов, а также ограниченная чувствительность к излучению в среднем инфракрасном диапазоне  
30 вследствие работы устройства преимущественно в ультрафиолетовой и видимой области спектра.

Для детектирования ближнего и среднего инфракрасного излучения известно техническое решение с использованием графена [3], в котором предложено использовать  
35 монослои графена, которые почти прозрачны для падающего излучения, благодаря чему происходит повышение эффективности переноса носителей заряда из поглощающего слоя SiGe. Перспективы использования двухмерного материала графена в оптоэлектронных устройствах обусловлены наличием уникальных электронных и оптических свойств, так как графен обладает высокой подвижностью носителей заряда,  
40 оптической прозрачностью, а также гибкостью, прочностью и устойчивостью к воздействию окружающей среды. Общим признаком с заявленным устройством является использование слоистой структуры, включающей монослой графена. Однако известное устройство не позволяет осуществлять прямое детектирование циркулярно-поляризованного ИК излучения без использования поляризаторов ввиду отсутствия  
45 избирательной чувствительности устройства к различным поляризациям излучения.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является устройство детектирования циркулярно-поляризованного света, содержащее графеновый слой и работающее на основе эффекта Холла [4]. Известное устройство включает базовый слой из Si или SiO<sub>2</sub>,

металлический слой, сформированный на базовом слое, и графеновый слой, сформированный по крайней мере на части металлического слоя. Металлический слой включает слой металлического листа и слой металлической конструкции, сформированный на слое металлического листа. При этом комбинированная структура слоя металлической конструкции и графенового слоя представляет собой хиральную структуру, периодически расположенную в горизонтальном направлении. Устройство оснащено электродами для пропускания электрического тока и возможностью прикладывания внешнего магнитного поля для регистрации обычного эффекта Холла. Описанное устройство принято за прототип заявляемого изобретения.

Общими с заявленным устройством признаками является использование базового слоя, металлического слоя, сформированного на базовом слое, и графенового слоя, а также электродов для пропускания электрического тока. Кроме того, общим признаком с заявленным устройством является использование периодической структуры, расположенной в горизонтальном направлении, наличие которой приводит к чувствительности устройства к циркулярно-поляризованному излучению.

Недостатком известного устройства является низкая чувствительность к излучению в среднем инфракрасном диапазоне и необходимость приложения внешнего магнитного поля. Указанные недостатки накладывают ограничения при конструировании и миниатюризации элементов оптоэлектронных интегральных схем на микрометровом масштабе и ограничивают детектирование циркулярно-поляризованного излучения в средней инфракрасной спектральной области.

Техническим результатом заявленного изобретения является расширение области применения детекторов циркулярно-поляризованного излучения в оптоэлектронных интегральных схемах на микрометровом масштабе за счет того, что ограничение на размеры устройства накладывается только длиной волны детектируемого излучения, а также расширение спектрального диапазона детектирования циркулярно-поляризованного излучения на среднюю инфракрасную область за счет высокой чувствительности графен-содержащей структуры к поляризованному излучению данного диапазона, и, кроме того, повышение температурного диапазона работы детектора за счет сохранения электронных свойств графен-содержащей структуры в широком диапазоне температур, вплоть до комнатной температуры.

Указанный технический результат достигается тем, что в известном инфракрасном детекторе циркулярно-поляризованного излучения на основе графена, содержащем базовый слой и сформированный на нем комбинированный металлический слой, выполненный из однородного слоя и слоя, содержащего структуры, расположенные периодически в горизонтальном направлении, а также графеновый слой, расположенный на металлическом слое, и электроды для пропускания электрического тока, в соответствии с заявленным изобретением, однородный слой выполнен из монокристаллического слоя кобальта с внутриплоскостной намагниченностью, слой с периодическими структурами выполнен из слоя золота толщиной 0,2-0,3 нм с периодическими структурными дислокациями треугольной формы, графеновый слой выполнен из эпитаксиального графена на металлическом слое, а электроды расположены на графеновом слое так, что направление пропускания тока и намагниченность слоя кобальта взаимно перпендикулярны.

В заявленном устройстве указанный технический результат достигается за счет того, что инфракрасный детектор циркулярно-поляризованного излучения выполнен из графен-содержащей структуры, чувствительной к циркулярно-поляризованному излучению в среднем инфракрасном диапазоне, в которой поперечная холловская

проводимость возникает за счет обменного взаимодействия и без приложения внешнего магнитного поля. При этом электронные свойства устройства сохраняются в широком диапазоне температур, вплоть до комнатной температуры. Сущность изобретения

Сущность заявленного устройства поясняется Фиг. 1-3.

5 На Фиг. 1 и Фиг. 2 представлена схема заявленного устройства. На Фиг. 1 представлен вид сбоку, а на Фиг. 2 представлен вид сверху заявленного устройства инфракрасного детектора циркулярно-поляризованного излучения на основе графена, которое содержит:  
1 - базовый слой, выполненный из монокристаллической пластины карбида кремния;  
10 2 - комбинированный металлический слой, состоящий из 22 - однородного слоя, выполненного из слоя кобальта с внутривосстановленной намагниченностью, и 23 - слоя со структурами, расположенными периодически в горизонтальном направлении, выполненного из слоя золота толщиной 0,2-0,3 нм; 3 - графеновый слой, расположенный на металлическом слое и выполненный из эпитаксиального монослоя графена. Слои 2 и 3 представляют собой эпитаксиально расположенные друг на друге слои и совпадают по размерам. Помимо этого, на Фиг. 1 представлены электроды для пропускания электрического тока - 4, расположенные на графеновом слое так, что направление пропускания тока и намагниченность слоя кобальта взаимно перпендикулярны.

Изобретение реализуется следующим образом (Фиг. 1).

15 Циркулярно-поляризованное излучение среднего инфракрасного диапазона (длина волны от 15 мкм до 3 мкм) падает на поверхность устройства. При этом через электроды на графене осуществляется пропускание постоянного электрического тока. Величина тока зависит от мощности падающего излучения.

Поверхность устройства представляет собой эпитаксиальный монослой графена на комбинированном металлическом слое Au/Co, размещенном на базовом слое SiC. За  
25 счет формирования в слое Au периодических структурных дислокаций треугольной формы вследствие поверхностного сплавления Au и Co [5,6] графен приобретает ферромагнитное упорядочение на атомах углерода двух неэквивалентных подрешеток графена. Ферромагнетизм внутри слоя графена оказывает влияние на его электронную структуру. Особенности электронной структуры такого графена приводят к  
30 неравновесному фотовозбуждению электронов в противоположных долинах зоны Бриллюэна. Как следствие, поверхность устройства (графен/Au/Co) является чувствительной к циркулярно-поляризованному излучению и может работать как детектор циркулярно-поляризованного излучения.

Облучение структуры графен/Au/Co циркулярно-поляризованным излучением  
35 инфракрасного диапазона с одновременным пропусканием продольного постоянного тока приводит к возникновению поперечной разности потенциалов (напряжения Холла) на краях образца в результате эффекта Холла циркулярного дихроизма. Измерение напряжения Холла в классической геометрии Холла (например, четырехзондовым методом ван дер Пау) обеспечивает детектирование падающего циркулярно-  
40 поляризованного излучения.

На Фиг. 3 проиллюстрированы характеристики работы заявленного устройства. Показана теоретически рассчитанная зависимость поперечной Холловской проводимости от энергии фотонов падающего излучения с циркулярной поляризацией. Зависимость получена в результате расчетов методом сильной связи с выбором  
45 параметров для согласования с экспериментальными данными. Максимумы на кривой проводимости Холла наблюдаются из-за включения новых межзонных переходов с увеличением энергии фотонов. Суммарная кривая проводимости имеет несколько экстремумов и позволяет регистрировать Холловское напряжение в широком диапазоне

среднего инфракрасного излучения.

Заявленное изобретение было апробировано в лабораторных условиях.

Пример осуществления изобретения.

Заявленное устройство было апробировано в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ). Конкретные примеры реализации приведены ниже:

Пример 1.

В качестве примера конкретной реализации представленного устройства были проведены экспериментальные и теоретические исследования образцов графен/Au/Co с использованием металлического однородного слоя, выполненного из монокристаллического слоя кобальта с кристаллографической ориентацией (0001) и с внутрислойной намагниченностью вдоль легкой оси, при этом металлический однородный слой расположен на базовом слое, выполненном из монокристалла SiC (0001). Получение монослоя графена на поверхности Au/Co в заявленном устройстве достигнуто путем синтеза графена на монокристаллической пленке Co методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), с последующим напылением монослойной пленки золота толщиной в 0,2-0,3 нм на графен и отжигом системы при температуре 600°C, что приводит к интеркаляции атомов золота и формированию под графеном требуемой структуры Au/Co. В комбинированной металлической структуре Au/Co формируются структурные дислокации треугольной формы, расположенные периодически в горизонтальном направлении (Фиг. 2), которые оказывают влияние на электронную и атомную структуру графена. При этом на поверхности графена размещены электроды для пропускания электрического тока. Электроды располагаются таким образом, чтобы направление пропускания тока и внутрислойная намагниченность слоя кобальта были взаимно перпендикулярны. Данная геометрия заявленного устройства при облучении циркулярно-поляризованным излучением инфракрасного диапазона с одновременным пропусканием продольного постоянного электрического обеспечивает возникновение в устройстве эффекта Холла циркулярного дихроизма, что в результате будет приводить к регистрации поперечной разности потенциалов (напряжения Холла) на краях образца. Регистрация напряжения Холла на краях образца является способом детектирования инфракрасного циркулярно-поляризованного излучения.

Характеристики работы данного примера реализации продемонстрированы на Фиг. 3. Показана теоретически рассчитанная зависимость поперечной Холловской проводимости от энергии фотонов падающего излучения с циркулярной поляризацией. Зависимость получена в результате расчетов методом сильной связи с выбором параметров для согласования с экспериментальными данными. Верхняя кривая, обозначенная « $r_x - ir_y$ » соответствует падающему излучению с отрицательной циркулярной поляризацией, а нижняя кривая, обозначенная « $r_x + ir_y$ » - падающему излучению с положительной циркулярной поляризацией. Для спектральной плотности мощности падающего излучения была выбрана прямоугольная форма с  $\Delta E/h\omega = 10\%$  и плотность потока 1 мкДж/см<sup>2</sup>.

Электрическая проводимость Холла в данной системе будет достигать целого кванта проводимости  $2e^2/h$  при энергии падающего излучения фотонов 110 мэВ (что соответствует проводимости  $\sim 7,7 \cdot 10^{-5}$  Сименс) и  $\sim 1/6e^2/h$  при энергии фотонов 400 мэВ с учетом всех возможных оптических переходов. При этом полярность напряжения Холла определяет знак преобладающей поляризации излучения. Таким образом, оптимальный регистрируемый диапазон инфракрасного излучения - средний, длина

волны от 15 мкм до 3 мкм (энергия излучения от 80 мэВ до 400 мэВ).

Пример 2. Заявленное устройство на Фиг. 1 и описанное в примере 1, но в качестве металлического однородного слоя используется монокристаллический слой никеля с кристаллографической ориентацией (111). Известно, что в поверхностном сплаве Au/Ni(111) также образуются периодические структурные дислокации треугольной формы [7,8]. Кроме того, вследствие хорошего согласования параметров кристаллических решеток подложки и графена, на поверхности монокристаллического слоя Ni(111) удается получать монослой графена хорошего качества и на широком масштабе. Таким образом, в данном примере конкретной реализации также будет наблюдаться возникновение поперечной Холловской проводимости при облучении структуры графен/Au/Ni циркулярно-поляризованным излучением инфракрасного диапазона с одновременным пропусканием продольного постоянного тока через структуру в результате эффекта Холла циркулярного дихроизма. Однако, в силу того, что магнитные моменты на атомах никеля меньше, чем в случае кобальта, наблюдаемый эффект будет менее выраженным.

Пример 3. Заявленное устройство на Фиг. 1 и описанное в примере 1, но базовый слой выполнен из монокристалла W(110). Использование монокристалла W(110) обеспечивает максимальную эпитаксию пленки кобальта или никеля, для качественного синтеза графен-содержащей структуры. Синтез графена на поверхности Au/Co(0001)/W(110) и Au/Ni(111)/W(110) является отработанной методикой, позволяющей получать высокую достоверность и воспроизводимость результатов. Однако использование монокристалла может увеличить стоимость изготовления такого устройства.

Технико-экономическая эффективность заявленного устройства состоит в получении детектора, обеспечивающего прямое детектирование инфракрасного излучения с циркулярной поляризацией благодаря использованию чувствительных к данному излучению материалов. Предлагаемое устройство позволяет использовать детекторы циркулярно-поляризованного излучения в оптоэлектронных интегральных схемах на микрометровом масштабе при комнатной температуре и без приложения внешнего магнитного поля. Заявленное устройство имеет коммерческую ценность и при доведении до промышленного производства может быть использовано в области оптоэлектроники и валлитроники.

Список используемой литературы

- [1] Patent WO2018017976 (A1) «FAR-INFRARED DETECTION USING WEYL SEMIMETALS» 2018-01-25
- [2] Патент RU 2452924 C1 «Способ определения знака циркулярной поляризации лазерного излучения» 10.06.2012 Бюл. №16
- [3] Patent US11374187 (B1) «Graphene enhanced SiGe near-infrared photodetectors and methods for constructing the same» 2022-06-28
- [4] Patent CN 109297602 (A) «Circular polarized light detection module based on Hall effect» 2019-02-01 (прототип)
- [5] A.G. Rybkin, et al. "Magneto-Spin-Orbit Graphene: Interplay between Exchange and Spin-Orbit Couplings" Nano Letters 18 (3), pp 1564-1574 (2018)
- [6] A.G. Rybkin, et al. "Sublattice ferrimagnetism in quasifreestanding graphene" Physical Review Letters, 129, 226401 (2022)
- [7] J. Jacobsen et al. "Atomic-Scale Determination of Misfit Dislocation Loops at Metal-Metal Interfaces" Phys. Rev. Lett. 75, 489 (1995)
- [8] F. Besenbacher "Scanning tunnelling microscopy studies of metal surfaces" Rep.Prog. Phys. 59, 1737-1802(1996)

## (57) Формула изобретения

Инфракрасный детектор циркулярно-поляризованного излучения на основе графена, включающий базовый слой и сформированный на нем комбинированный металлический слой, состоящий из однородного слоя и слоя, содержащего структуры, расположенные периодически в горизонтальном направлении, а также графеновый слой, расположенный на металлическом слое, и электроды для пропускания электрического тока, отличающийся тем, что однородный слой выполнен из монокристаллического слоя кобальта с внутривоскостной намагниченностью, слой с периодическими структурами выполнен из слоя золота толщиной 0,2-0,3 нм с периодическими структурными дислокациями треугольной формы, графеновый слой выполнен из эпитаксиального графена на металлическом слое, а электроды расположены на графеновом слое так, что направление пропускания тока и намагниченность слоя кобальта взаимно перпендикулярны.

15

20

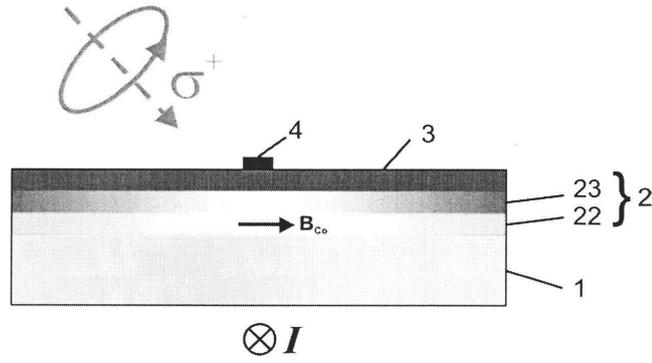
25

30

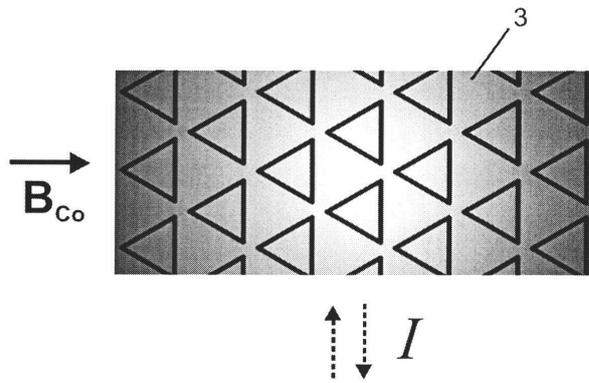
35

40

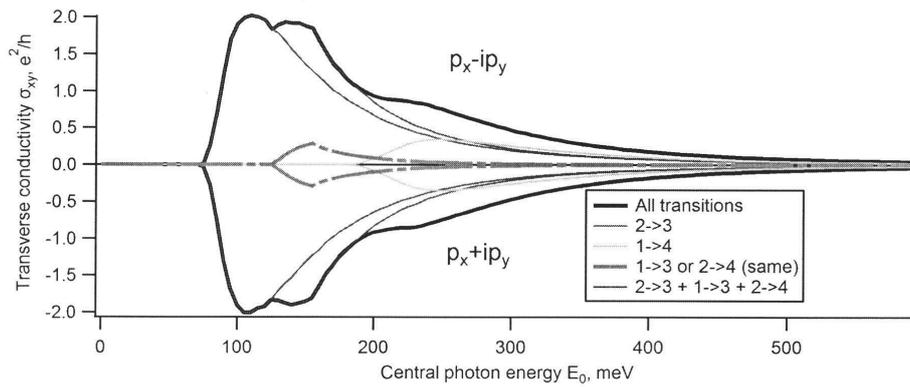
45



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3